

(12)特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2003 年 11 月 6 日 (06.11.2003)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 03/092110 A1

(51) 国際特許分類: H01M 8/18, 8/04

阪市北区 中之島 3 丁目 3 番 2 2 号 関西電力株式会社 社内 Osaka (JP).

(21) 国際出願番号: PCT/JP03/05059

(22) 国際出願日: 2003 年 4 月 21 日 (21.04.2003)

(74) 代理人: 山野 宏 (YAMANO, Hiroshi); 〒532-0011 大阪府 大阪市淀川区 西中島 1 丁目 9 番 20 号 新中島ビル 7 階 啓明特許事務所 Osaka (JP).

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願2002-120157 2002 年 4 月 23 日 (23.04.2002) JP

(81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 住友電気工業株式会社 (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.) [JP/JP]; 〒541-0041 大阪府 大阪市中央区 北浜四丁目 5 番 3 3 号 Osaka (JP). 関西電力株式会社 (THE KANSAI ELECTRIC POWER CO., INC.) [JP/JP]; 〒530-8270 大阪府 大阪市北区 中之島 3 丁目 3 番 2 2 号 Osaka (JP).

(84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(72) 発明者; および

(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 出口 洋成 (DEGUCHI, Hiroshige) [JP/JP]; 〒554-0024 大阪府 大阪市此花区 島屋一丁目 1 番 3 号 住友電気工業株式会社 大阪製作所内 Osaka (JP). 重松 敏夫 (SHIGEMATSU, Toshio) [JP/JP]; 〒554-0024 大阪府 大阪市此花区 島屋一丁目 1 番 3 号 住友電気工業株式会社 大阪製作所内 Osaka (JP). 徳田 信幸 (TOKUDA, Nobuyuki) [JP/JP]; 〒530-8270 大阪府 大

添付公開書類:
— 国際調査報告書

2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各 PCT ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(54) Title: METHOD FOR DESIGNING REDOX FLOW BATTERY SYSTEM

(54) 発明の名称: レドックスフロー電池システムの設計方法

(57) Abstract: A method for designing a redox flow battery system. Decrease in the system efficiency during charging/discharging due to a weak generated power or the load power is prevented without using a lead acid storage and thereby the system efficiency is enhanced. A power generator the power generation output of which varies irregularly is provided with a redox flow battery to smoothen the power generation output. The means value and the standard deviation of the battery output distribution to the smoothened power generation output are determined. At least one of the rated output of the battery and that of a converter that converts the battery output is determined on the basis of the standard deviation.

(57) 要約: 鉛蓄電池を用いることなく微弱な発電電力や負荷電力による充放電時のシステム効率を低下させず、かつシステム効率をより向上できるレドックスフロー電池システムの設計方法を提供する。本発明は、発電出力が不規則変動する発電装置にレドックスフロー電池を具えて発電出力を平滑化する。前記平滑化された発電出力に対する電池の出力分布の平均値と標準偏差を求める。そして、電池の規定出力及び電池の出力を変換する変換器の規定出力の少なくとも一方を前記標準偏差に基づいて決定する。

1

明 細 書

レドックスフロー電池システムの設計方法

5 技術分野

本発明は、セルに電解液を供給・排出させるレドックスフロー電池を具えるレドックスフロー電池システムの設計方法に関する。特に、電池システムの損失を低減することができるレドックスフロー電池システムの設計方法に関する。

10

背景技術

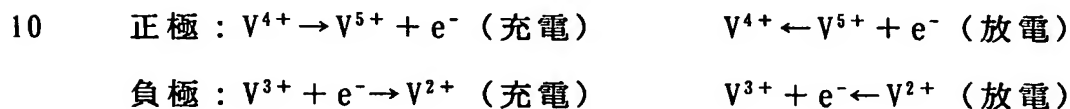
電力供給の特異性として、電力消費に即応した供給、いわゆる同時同量と呼ばれる供給が必要である。一方、近年、新エネルギーとして風力発電や太陽光発電などの開発が目覚しい。しかし、これら風力発電や太陽光発電などは、発電出力が不規則な電源であり、それ単独で十分な電力供給源と成り得ず、何らかの蓄電池と組み合わせて発電出力を安定させることが検討されている。蓄電池としてレドックスフロー電池を用いた技術が特開昭 61-218070 号公報に記載されている。

この公報には、レドックスフロー電池の総合効率を低下させるポンプ動力の損失やシャント電流による損失を入力電力に対応して小さくするために、ポンプなどの可動部を必要としない鉛蓄電池を更に併設することが記載されている。

レドックスフロー電池は、従来、負荷平準化や瞬低対策用として利用されているものであり、図 8 に動作原理を示す。この電池は、イオン交換膜からなる隔膜 103 で正極セル 100A と負極セル 100B とに分離されたセル 100 を具える。正極セル 100A と負極セル 100B の各々には

2

正極電極 104 と負極電極 105 とを内蔵している。正極セル 100A には正極電解液を供給・排出するための正極用タンク 101 が導管 106、107 を介して接続されている。負極セル 100B にも負極電解液を導入・排出する負極用タンク 102 が同様に導管 109、110 を介して接続されている。各電解液にはバナジウムイオンなど原子価が変化するイオンの水溶液を用い、ポンプ 108、111 で循環させ、正負極電極 104、105 におけるイオンの価数変化反応に伴って充放電を行う。例えば、バナジウムイオンを含む電解液を用いた場合、セル内で充放電時に生じる反応は次のとおりである。



しかし、上記公報に記載の技術のように、微弱な発電電力や負荷電力による充放電時の効率低下を改善する、即ち、充放電時のシステムの損失を増大させないために鉛蓄電池を併設すると、コスト高になるだけでなく、設備も大きなものとなるという問題がある。

レドックスフロー電池では、セルに電解液を供給・排出するためにポンプの可動が必要不可欠である。そのため、従来、コスト高であるなどの問題を抱えながらも、発電出力が不規則な電源に鉛蓄電池を併設していた。

20 システムの損失は、一般に電池ロスと変換器ロスとを併せたものである。上記公報に記載の技術では、電池ロスの要因のうち、ポンプ動力ロスとシャント電流ロスについては考慮されていたが、電池抵抗（セル抵抗）による効率ロスは考慮されていなかった。従って、損失をより低減することができるシステムが望まれる。

25 一方、従来は、上記の微弱な発電電力や負荷電力による充放電時の効率低下という問題を考慮せず、発電出力が不規則な電源にレドック

3

スフロー電池のみを設置し、鉛蓄電池を併設しないこともあった。このとき、風力発電や太陽光発電などの発電出力が不安定な電源の規模（発電出力、発電出力変動など）に対して、どの程度の規模の蓄電池を組み合わせればよいか全く検討されておらず、設計指針もなかった。

- 5 そのため、レドックスフロー電池は、適当な規模のもの、具体的には、発電出力の半分程度の出力規模を有するものを組み合わせて運用していたが、このような運用ではシステムの損失が大きく、引いてはシステム効率が悪いという問題があった。

- 10 また、従来は、風力発電や太陽電池などの発電出力が不安定な電源の規模（発電出力、発電出力変動）に対して、どの程度の規模の変換器を組み合わせればよいかも全く検討されておらず、設計指針もなかった。そのため、従来は、発電出力が不安定な電源を具えるレドックスフロー電池システムについて、変換器ロスが全く考慮されていなかった。

- 15 更に、上記のように発電電力が不安定な電源の出力安定化を行う場合だけでなく、負荷平準用途、瞬低用途などといった消費電力が不規則変動するような用途に用いられるレドックスフロー電池に対しても、システムの損失をより小さくすることが可能な設計指針は検討されていなかった。

- 20 加えて、システムの損失だけでなく、コストの低減や設備の大きさなどを加味して、より最適なレドックスフロー電池を設計できる方法が望まれる。

- 25 そこで、本発明の主目的は、発電電力が不安定な電源の出力安定化や需給制御のような不規則運転を行うレドックスフロー電池において、より最適なレドックスフロー電池を設計することができるレドックスフロー電池の設計方法を提供することにある。

4

本発明の別の目的は、鉛蓄電池を用いることなく微弱な発電電力や負荷電力による充放電時のシステムの損失を低減することができるレドックスフロー電池システムの設計方法を提供することにある。

5 発明の開示

本発明は、以下の知見に基づき、規定するものである。

- (1) ロス(損失特性)などのシステムを評価する指標が実用的に二次関数とみなせる。
- (2) 上記指標に関与する平滑化された発電出力に対する電池の出力などの外部パラメータが確率分布を持つ。
- (3) 上記指標に関与する電池ロス、変換器ロスなどの内部パラメータの期待値が上記確率分布を持つ内部パラメータの平均値や標準偏差から得られる。
- (4) 以上から、上記指標を最適化するための内部パラメータの最適値が求められる。具体的には、例えば、システムの損失をより小さくするための電池や変換器の規定出力などが求められる。また、上記指標を最適化するための内部パラメータの最適値は、上記確率分布の標準偏差の n 倍と表すことができる。具体的には、例えば、システムの損失をより小さくするための電池や変換器の規定出力は、上記確率分布の標準偏差の n 倍と表すことができる。

即ち、本発明は、セルに電解液を供給・排出させるレドックスフロー電池を具えるレドックスフロー電池システムの設計方法であって、以下を特徴とする。まず、設計者が任意に選択することができないレドックスフロー電池の運転条件によって与えられる外部パラメータを決定する。また、設計者が任意に設計することができるレドックスフロー電池の設計条件によって与えられる内部パラメータを決定する。

そして、上記外部パラメータの変動値の平均及び標準偏差を求め、上記内部パラメータの最適値を求めた平均及び標準偏差の少なくとも一方に基づいて決定する。

従来、発電出力が不規則な電源に鉛蓄電池を併設することなく微弱な発電電力や負荷電力による充放電時の損失の増加を改善することは、不可能だと考えられてきた。また、上記電源の出力安定化だけでなく、需給制御などの不規則運転を行うレドックスフロー電池を設計するに当り、最適な設計方法が知られていなかった。しかし、本発明者らが、種々検討した結果、レドックスフロー電池の規模(規定出力、セル数など)やインバータなどの直流/交流変換器の規模(規定出力など)、その他運転条件(一セルあたりの電解液の流量、電解液の温度など)を上記のような特定の方法により決定することで、システムの損失の低減化などといった上記システムの指標を最適化することができることを見出し、本発明を完成するに至った。以下、本発明をより詳しく説明する。

上記外部パラメータは、設計者が任意に選択することができないレドックスフロー電池の運転条件によって与えられるパラメータとする。上記運転条件は、例えば、レドックスフロー電池が設置される場所の環境、同電池の用途、ユーザの要望などによって適宜変化される。より具体的には、例えば、レドックスフロー電池が設置される場所の外気温は、設計者が任意に選択することができないパラメータである。その他、風力発電や太陽光発電などの発電出力が不規則変動する発電装置の発電電力を平滑化する用途、負荷平準用途、瞬低用途などのいずれの用途にするのかは、ユーザの要望により決められるものであり、また、これらの用途における発電電力や消費電力などは、設計者が決定することがほとんどできない。従って、上記に係わるパラメータ、

6

具体的には、例えば、発電出力が不規則変動する発電装置の発電出力を平滑化する電池の出力、消費電力が不規則変動する負荷の消費電力を平滑化する電池の出力なども任意に選択することができないパラメータとなる。更に、レドックスフロー電池の kW 容量、kWh 容量などもユーザの要望により決められるパラメータであり、設計者が任意に選択することができないパラメータである。

このように外部パラメータには、設置場所の外気温などの自然現象によって変動する値をとるパラメータや、不規則な発電電力や消費電力を平滑化する電池の出力などの経時的に変動する値をとるパラメータなどの不規則或いは確率的な現象に依存する値をとるものと、kW 容量などの固定値をとるものとが有り得る。従って、外部パラメータの選択によっては、確率的な現象に依存する値をとるパラメータのみとすることもできるし、固定値をとるパラメータのみとすることもできるし、両方を含む場合ももちろんできる。また、外部パラメータは、一つでも複数でもよい。

本発明では、上記のような確率的な現象に依存する値をとるパラメータを少なくとも一つ含む場合を特に規定するものであり、その他、固定値をとるパラメータを含んでいてもよい。また、これら確率的な現象に依存する値をとるパラメータは、平均と、標準偏差(或いは分散)が与えられるものとする。例えば、外部パラメータとして、発電出力が不規則変動する発電装置の発電出力を平滑化する電池の出力や、消費電力が不規則変動する負荷の消費電力を平滑化する電池の出力を選択する場合、経時的に変化する個々の出力により、平均と標準偏差とを求めるとよい。経時的に変化する個々の出力とは、例えば、秒単位、kW 単位で検討する場合、○年○月○日○時○分○秒の電池の出力(kW)、その+1 秒後の電池の出力(kW)、更にその+1 秒後の電池の

出力(kW)、…が挙げられる。例えば、外部パラメータとして、設置場所の外気温を選択する場合、経時的に変化する個々の気温により、平均と標準偏差とを求めるとよい。経時的に変化する個々の気温とは、例えば、分単位、K(ケルビン)で検討する場合、○年○月○日○時○
5 分の気温(K)、その+1分後の気温(K)、更にその+1分後の気温(K)、…が挙げられる。

また、用途が選択された場合の平均と標準偏差とを有する外部パラメータとしては、例えば、以下が挙げられる。風力発電や太陽光発電などの発電出力が不規則変動する発電装置の発電電力を平滑化する用途の場合、発電出力が不規則変動する発電装置の発電電力を平滑化する電池の出力が挙げられる。負荷平準用途の場合、消費電力が不規則変動する負荷の消費電力を平滑化する電池の出力が挙げられる。瞬低用途の場合、設置場所の外気温が挙げられる。

なお、本発明において発電出力を平滑化するとは、発電出力にある
15 閾値を設けておき、閾値を上回った場合、閾値を超えた余剰の出力を電池に充電し、閾値を下回った場合、不足した出力を電池によって放電することをいう。また、本発明において消費電力を平滑化するとは、同様に消費電力に閾値を設けておき、閾値を上回った場合、閾値を超えた不足出力を電池によって放電し、閾値を下回った場合、余剰の出力
20 を電池に充電することをいう。これら閾値は、電池の充電と放電とで同じ値を用いてもよいし、異なる値を用いてもよい。また、閾値は、時刻や発電出力の状況などによって変化させてもよい。

内部パラメータは、設計者が任意に設計することができるレドックスフロー電池の設計条件によって与えられるパラメータとする。より
25 具体的には、電池の規定出力、電池の個数、セル数、電解液を貯留するタンクの液量、一セルあたりの電解液の流量、電解液の温度、電池

8

の出力を変換する直流/交流変換器の規定出力、及び電池の出力を変換する直流/交流変換器の個数などが挙げられる。このように内部パラメータは、外部パラメータと異なり、固定値をとるパラメータである。このような内部パラメータは、一つでもよいし、複数でもよい。

5 内部パラメータの最適値を算出する方法を具体的に説明する。

<1> 外部パラメータが固定値をとるパラメータのみである場合

外部パラメータを x_1, x_2, \dots とする。 x_1, x_2, \dots はいずれも固定値で、異なるパラメータとする。例えば、 x_1 : kW 容量、 x_2 : kWh 容量、 \dots とする。

10 内部パラメータを y_1, y_2, \dots とする。 y_1, y_2, \dots はいずれも異なるパラメータとする。例えば、 y_1 : 電池の規定出力、 y_2 : 直流/交流変換器の規定出力、 \dots とする。

システムを評価する指標関数を $f(x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots)$ とする。 f は、例えば、システムの損失(効率)、コスト、サイズなどが挙げられる。これらのうち、少なくとも一つを含むものとする。

このとき、 f が最適化されるのは、 f が極値をとる場合、即ち、 $\partial f / \partial y_i = 0$ となる場合、或いは y_i が可変範囲における最大値又は最小値をとる場合である。後者の場合、可変範囲の境界にある値が最大値又は最小値の候補として挙げられる。

20 従って、外部パラメータが固定値をとるパラメータの場合、上記のように偏微分などを行うことで f の最適値を容易に求めることができる。

<2> 外部パラメータが不規則な或いは確率的な現象に依存する値をとるパラメータを含む場合

25 外部パラメータを $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots$ とする。 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots$ はいずれも異なるパラメータで、そのうちいくつかのパラメータ : x_i

は、確率的な現象に依存する値をとるパラメータとする。例えば、 x_{k1} ($i=k1$): 発電出力が不規則変動する発電装置の発電出力を平滑化する電池の出力、 x_{k2} ($i=k2$): 電池の設置場所の外気温、…とする。

また、 x_i は、平均と、標準偏差が与えられているものとし、平均を
 5 $x_{i\text{ ave}}$ 、標準偏差を σ_{xi} (分散 σ_{xi}^2) とする。その他の外部パラメータ：
 x_1 、 x_2 、…は、固定値をとるパラメータとする。

内部パラメータを上記と同様に y_1 、 y_2 、…とする。

このとき、システムを評価する指標関数 $f(x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots)$ を、上記外部パラメータ x_i の平均： $x_{i\text{ ave}}$ と分散 σ_{xi}^2 とを考慮した
 10 新たな指標関数 $g(x_1, x_2, \dots, x_{k1\text{ ave}}, \sigma_{xk1}^2, x_{k2\text{ ave}}, \sigma_{xk2}^2, \dots, x_{i\text{ ave}}, \sigma_{xi}^2, y_1, y_2, \dots)$ と書き直すことができれば、 g が極値をとる場合、 $\partial f / \partial y_i = 0$ となる場合、或いは y_i が可変範囲における最大値又は最小値をとる場合に g を最適化することができる。

そこで、まず、 $f(x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots)$ を $g(x_1, x_2, \dots, x_{k1\text{ ave}},$
 15 $\sigma_{xk1}^2, x_{k2\text{ ave}}, \sigma_{xk2}^2, \dots, x_{i\text{ ave}}, \sigma_{xi}^2, y_1, y_2, \dots)$ と書き直すことが可能となる条件を示す。

ここでは、外部パラメータのうち、一つのパラメータ x_i が不規則
 或いは確率的な現象に依存する値をもち、平均： $x_{i\text{ ave}}$ と分散： σ_{xi}^2
 とを持つものとする。このとき、 x_i は、経時的に変化する個々の値：
 20 $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}$ が得られるとする。

このとき、平均： $x_{i\text{ ave}}$ は、以下の式 1.1、また、分散： σ_{xi}^2 は、
 以下の式 1.2 で求められるものとする。

$$x_{i\text{ ave}} = \frac{x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{iN}}{N} \dots \text{式1.1}$$

$$\sigma_{xi}^2 = \frac{(x_{i\text{ ave}} - x_{i1})^2 + (x_{i\text{ ave}} - x_{i2})^2 + \dots + (x_{i\text{ ave}} - x_{iN})^2}{N} \dots \text{式1.2}$$

10

経時的に変化する個々の値： x_{i1} 、 x_{i2} 、 \dots 、 x_{iN} を平均： $x_{i\text{ave}}$ と、平均： $x_{i\text{ave}}$ からの差 Δ_j を用いて、 $x_{i1}=x_{i\text{ave}}+\Delta_1$ 、 $x_{i2}=x_{i\text{ave}}+\Delta_2$ 、 \dots 、 $x_{iN}=x_{i\text{ave}}+\Delta_N$ と書き直す。すると、以下の式 1.3、式 1.4 のように書き直すことができる。

$$5 \quad \text{式 1.1 より、} \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_N = 0 \quad \dots \quad \text{式 1.3}$$

$$\text{式1.2より、} \frac{(\Delta_1)^2 + (\Delta_2)^2 + \dots + (\Delta_N)^2}{N} = \sigma_{x_i}^2 \dots \quad \text{式1.4}$$

次に、システムを評価する指標関数 $f(x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots)$ を $x_{i\text{ave}}$ 近傍で、即ち、 $x_{i\text{ave}} + \Delta$ についてテーラー展開する。

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_{i\text{ave}} + \Delta, y_1, y_2, \dots) = \\ f(x_1, x_2, \dots, x_{i\text{ave}}, y_1, y_2, \dots) + \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \Delta + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \cdot \Delta^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i^3} \cdot \Delta^3 + \dots \end{aligned}$$

... 式1.5

10 上記式 1.5 を用いて、指標関数 f において、外部パラメータ x_i の個々の値 x_{i1} 、 x_{i2} 、 \dots 、 x_{iN} に対する期待値 f_{ave} を求める。

$$\begin{aligned} f_{\text{ave}} &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(x_1, x_2, \dots, x_{ij}, y_1, y_2, \dots) \\ &= f(x_1, x_2, \dots, x_{i\text{ave}}, y_1, y_2, \dots) \\ &\quad + \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \left(\frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_N}{N} \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \cdot \left(\frac{(\Delta_1)^2 + (\Delta_2)^2 + \dots + (\Delta_N)^2}{N} \right) \\ &\quad + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i^3} \cdot \left(\frac{(\Delta_1)^3 + (\Delta_2)^3 + \dots + (\Delta_N)^3}{N} \right) + \dots \end{aligned}$$

... 式1.6

上記式 1.6 に式 1.3 及び式 1.4 を代入すると、以下の式 1.7 が得られる。

$$\begin{aligned} f_{\text{ave}} &= f(x_1, x_2, \dots, x_{i\text{ave}}, y_1, y_2, \dots) \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \cdot \sigma_{x_i}^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i^3} \cdot \left(\frac{(\Delta_1)^3 + (\Delta_2)^3 + \dots + (\Delta_N)^3}{N} \right) + \dots \end{aligned}$$

... 式1.7

従って、 $f(x_1, x_2, \dots, x_i, y_1, y_2, \dots)$ を $g(x_1, x_2, \dots, x_{i\text{ave}}, \sigma$

1 1

$x_i^2, \dots, y_1, y_2, \dots)$ と書き直すことが可能になるのは、上記式 1.7 より、 $f(x_1, x_2, \dots, x_i, y_1, y_2, \dots)$ において、 x_i の3次以上の導関数がゼロとなる場合である。即ち、以下の式 1.8 を満たすときである。

$$\frac{\partial^3 f}{\partial x_i^3} = \frac{\partial^4 f}{\partial x_i^4} = \dots = 0 \dots \quad \text{式1.8}$$

- 5 これは、 $f(x_1, x_2, \dots, x_i, y_1, y_2, \dots)$ が x_i の二次式になっている場合である。即ち、

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_i, y_1, y_2, \dots) \\ &= a(x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots) \cdot x_i^2 \\ &+ b(x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots) \cdot x_i \\ &+ c(x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots) \quad \dots \text{式 1.9} \end{aligned}$$

10

のときに、

$$\begin{aligned} g(x_1, x_2, \dots, x_{i \text{ ave}}, \sigma_{x_i}^2, \dots, y_1, y_2, \dots) \\ &= a \cdot x_i^2 + b \cdot x_i + c + a \cdot \sigma_{x_i}^2 \quad \dots \text{式 1.10} \end{aligned}$$

となる。

- 15 従って、指標関数 $f(x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots)$ を $g(x_1, x_2, \dots, x_{k1 \text{ ave}}, \sigma_{x_{k1}}^2, x_{k2 \text{ ave}}, \sigma_{x_{k2}}^2, \dots, x_{i \text{ ave}}, \sigma_{x_i}^2, y_1, y_2, \dots)$ と書き直すことができる条件は、 $f(x_1, x_2, \dots, x_i, y_1, y_2, \dots)$ が平均と分散とを有する外部パラメータ x_i についての二次式となる場合であることが示された。

- 20 なお、上記 $f(x_1, x_2, \dots, x_i, y_1, y_2, \dots)$ は、厳密に x_i についての二次式とならない場合であっても、二次式に近似すれば、2次の導関数までを考慮することになる。実用的には、二次式で十分に実際の特性を近似できる場合が多いと考えられる。しかし、式 1.7 より、2次よりも高次の項、具体的には、

1 2

$$\frac{(\Delta_1)^3 + (\Delta_2)^3 + \dots + (\Delta_N)^3}{N}, \frac{(\Delta_1)^4 + (\Delta_2)^4 + \dots + (\Delta_N)^4}{N} \dots$$

の影響を考慮して、三次式以上で近似することもできる。具体的には、以下に示す。

(1) f が x_i の一次式となる場合

$$5 \quad f = a \cdot x_i + b \rightarrow g = a \cdot x_{i \text{ ave}} + b$$

従って、 g は、平均： $x_{i \text{ ave}}$ により最適値が得られる。

(2) f が x_i の二次式となる場合

$$f = a \cdot x_i^2 + b \cdot x_i + c \rightarrow g = a \cdot x_{i \text{ ave}}^2 + b \cdot x_{i \text{ ave}} + c + a \cdot \sigma_{xi}^2$$

10 従って、 g は、平均： $x_{i \text{ ave}}$ 及び分散 σ_{xi}^2 により最適値が得られる。

(3) f が x_i の三次式となる場合

$$f = a \cdot x_i^3 + b \cdot x_i^2 + c \cdot x_i + d \rightarrow$$

$$f = a \cdot x_{i \text{ ave}}^3 + 3a \cdot x_{i \text{ ave}} \cdot \sigma_{xi}^2 + a \cdot \frac{(\Delta_{i_1})^3 + (\Delta_{i_2})^3 + \dots + (\Delta_{i_N})^3}{N} \\ + b \cdot x_{i \text{ ave}}^2 + b \cdot \sigma_{xi}^2 + c \cdot x_{i \text{ ave}} + d$$

従って、 g は、平均： $x_{i \text{ ave}}$ 、分散 σ_{xi}^2 、

$$15 \quad \frac{(\Delta_{i_1})^3 + (\Delta_{i_2})^3 + \dots + (\Delta_{i_N})^3}{N} \text{ により最適値が得られる。}$$

上記は、外部パラメータのうち、不規則或いは確率的な現象に依存する値をもつパラメータ、即ち、平均と標準偏差とが与えられているパラメータが一つの場合を説明した。しかし、このようなパラメータが複数選択される場合もあり得る。その場合は、 f をそれらのパラメータに関する二次式に書き直せばよい。例えば、平均と標準偏差とが与えられている外部パラメータが二つある場合を以下に説明する。

外部パラメータとして、平均と標準偏差とが与えられているパラメ

1 3

ータを x 、 y とする。そして、これらの平均、分散をそれぞれ x_{ave} 、 y_{ave} 、 σ_x^2 、 σ_y^2 とする。なお、これらパラメータ x 、 y は相関がないものとする。

この場合、指標関数 $f(x, y)$ は、 x 及び y について二元二次関数の
5 形にまとめることができるものとし、 f の係数を a_{ij} とすると、

$$\begin{aligned} f = & a_{22} \cdot x^2 \cdot y^2 + a_{21} \cdot x^2 \cdot y^1 + a_{20} \cdot x^2 \cdot y^0 \\ & + a_{12} \cdot x^1 \cdot y^2 + a_{11} \cdot x^1 \cdot y^1 + a_{10} \cdot x^1 \cdot y^0 \\ & + a_{02} \cdot x^0 \cdot y^2 + a_{01} \cdot x^0 \cdot y^1 + a_{00} \cdot x^0 \cdot y^0 \end{aligned}$$

と、書き表すことができる。

10 経時的に変化する個々の値と平均との差 Δ により、 $x = x_{ave} + \Delta_x$ 、 $y = y_{ave} + \Delta_y$ として、関数 f に代入すると、

$$\begin{aligned} f = & a_{22} \cdot (x_{ave} + \Delta_x)^2 \cdot (y_{ave} + \Delta_y)^2 + a_{21} \cdot (x_{ave} + \Delta_x)^2 \cdot (y_{ave} + \Delta_y) \\ & + a_{20} \cdot (x_{ave} + \Delta_x)^2 \\ & + a_{12} \cdot (x_{ave} + \Delta_x) \cdot (y_{ave} + \Delta_y)^2 + a_{11} \cdot (x_{ave} + \Delta_x) \cdot (y_{ave} + \Delta_y) \\ 15 & + a_{10} \cdot (x_{ave} + \Delta_x) \\ & + a_{02} \cdot (y_{ave} + \Delta_y)^2 + a_{01} \cdot (y_{ave} + \Delta_y) + a_{00} \end{aligned}$$

となる。

上記関数 f の項をテーラー展開して、外部パラメータの平均と分散の影響を考慮する必要が生じるのは、展開後に、係数として Δ_x 、 Δ_y 、

20 Δ_x^2 、 Δ_y^2 、 $\Delta_x \Delta_y$ 、 $\Delta_x \Delta_y^2$ 、 $\Delta_x^2 \Delta_y$ 、 $\Delta_x^2 \Delta_y^2$ を含む項である。

関数 f の展開後のそれぞれの項に対して、下記の変数変換を行う。

$$\textcircled{1} \quad \Delta_x \rightarrow 0 \quad \Delta_y \rightarrow 0 \quad \Delta_x^2 \rightarrow \sigma_x^2 \quad \Delta_y^2 \rightarrow \sigma_y^2 \quad \Delta_x \Delta_y \rightarrow 0$$

$$\textcircled{2} \quad \Delta_x \Delta_y^2 \rightarrow 0 \quad \Delta_x^2 \Delta_y \rightarrow 0 \quad \Delta_x^2 \Delta_y^2 \rightarrow \sigma_x^2 \sigma_y^2$$

変数変換①において、 $\Delta_x \rightarrow 0$ 、 $\Delta_y \rightarrow 0$ 、 $\Delta_x^2 \rightarrow \sigma_x^2$ 、 $\Delta_y^2 \rightarrow \sigma_y^2$ は、

25 平均及び分散の定義から決定される。 $\Delta_x \Delta_y \rightarrow 0$ は、「相関なし」との定義から決定される。変数変換②については、上記の変換が与えら

れるものとする。

上記①及び②の変数変換を行って $f(x, y)$ を $g(x_{ave}, y_{ave}, \sigma_x^2, \sigma_y^2)$ に書き直すとよい。

上記の手順に従い、特に、発電出力が不規則変動する発電装置の発電出力を平滑化するレドックスフロー電池の出力により、電池の規定出力、電池の個数、電池の出力を変換する直流/交流変換器の規定出力、及び電池の出力を変換する直流/交流変換器の個数の少なくとも一つを得る場合、まず、発電出力が不規則変動する発電装置の発電出力を平滑化するレドックスフロー電池の出力分布の標準偏差を求める。
そして、上記電池の規定出力、電池の個数、直流/交流変換器の規定出力、及び直流/交流変換器の個数の少なくとも一つを前記標準偏差に基づいて決定するとよい。

上記直流/交流変換器の規定出力は、平滑化された発電出力に対する電池の出力分布の標準偏差の1倍以上4倍以下が好ましい。より好ましくは、1倍以上2.5倍以下である。また、電池の規定出力は、上記標準偏差の0.7倍以上2倍以下が好ましい。より好ましくは、0.9倍以上1.5倍以下である。変換器やレドックスフロー電池の規定出力が上記の値を満たすとき、システムの損失をより小さく、引いてはシステム効率をより大きくすることができる。電池の規定出力は、電極面積を変化させることや直並列に接続されるセル数を変化させることなどにより変更することができる。変換器の規定出力は、変換器に使用される半導体素子の容量や直並列させる素子の数を変化させることなどにより変更することができる。

25 図面の簡単な説明

第1図は、レドックスフロー電池における損失特性と損失率との関

1 5

係を示すグラフ、第 2 図は、電池システムの電池出力のヒストグラム、第 3 図は、AC 端出力に対する変換器の損失特性を表すグラフ、第 4 図は、変換器の規定出力と変換器の損失特性の関係を表すグラフ、第 5 図は、AC 端出力に対するレドックスフロー電池の損失特性を表すグラフ、第 6 図は、近似式の係数と一セルに対する電解液の単位時間当たりの流量との関係を示すグラフ、第 7 図は、レドックスフロー電池の規定出力と損失特性の関係を表すグラフ、第 8 図は、レドックスフロー電池の動作原理を示す模式図である。

10 発明を実施するための最良の形態

以下、本発明の実施の形態を説明する。

(内部パラメータの最適値を算出する方法の概要)

(1) 外部パラメータとして x_1 、 x_2 を選択する。内部パラメータとして y_1 、 y_2 選択する。

15 外部パラメータ x_1 は、不規則或いは確率的な現象に依存し、平均 x_{1ave} と分散 $\sigma_{x_1}^2$ とが与えられているとする。外部パラメータ x_2 は、固定値が与えられているとする。

(2) システムを評価する指標関数： $f(x_1, x_2, y_1, y_2)$ を求め、 f を x_1 についての二次式の形にまとめる。

20
$$f = a(x_2, y_1, y_2)x_1^2 + b(x_2, y_1, y_2)x_1 + c(x_2, y_1, y_2)$$

(3) 外部パラメータ x_1 の平均 x_{1ave} と分散 $\sigma_{x_1}^2$ とを考慮した新たな指標関数 g を以下のように与える。

$$g = a(x_2, y_1, y_2)x_{1ave}^2 + b(x_2, y_1, y_2)x_{1ave} + c(x_2, y_1, y_2) + a(x_2, y_1, y_2)\sigma_{x_1}^2$$

25 (4) 上記新たな指標関数 g が極値をとるときの y_1 、即ち、 $\partial f / \partial y_1 = 0$ となるときの y_1 、又は y_1 の可変範囲における最大値或いは最小

16

値が、 g を最適化する候補となる。そして、 g を最適化する y_i が内部パラメータの最適値となる。

以下、外部パラメータ、内部パラメータ、指標関数 f を具体的に挙げて説明する。本例では、風力発電や太陽光発電などの発電出力が不規則変動する発電装置の発電出力を平滑化する用途とする場合において、システム効率を最適化する内部パラメータの最適値の算出方法を説明する。

(平滑化された発電出力に対する電池の出力が一定の場合)

外部パラメータとして、平滑化された発電出力に対する電池の出力(以下、電池出力とする)を選択する。ここでは、電池出力が一定の場合を考える。また、内部パラメータとして、レドックスフロー電池の規定出力、変換器の規定出力や電解液の流量、電解液の温度などとする。

充電時又は放電時におけるシステム効率の定義を①電池出力/(電池出力+損失)、②(電池出力-損失)/電池出力、損失率の定義を③損失/電池出力として、それぞれの場合にシステム効率を最大にする、又は損失率を最小にする条件を求めた。いずれの場合も、システム効率、損失率を電池出力、内部パラメータで偏微分して最大又は最小となる条件を求めた。①の場合を以下に示す。

電池出力を x 、内部パラメータを y 、損失を $f(x, y)$ 、充電時又は放電時におけるシステム効率を $\eta = x/(x + f)$ とする。システム効率が最大となるとき、効率は極値をとる。従って、システム効率が最大となる条件は、 $\partial \eta / \partial x = 0$ 、 $\partial \eta / \partial y = 0$ 、即ち、式 2.1、式 2.2 となる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1 \cdot (x + f) - x \cdot (1 + \frac{\partial f}{\partial x})}{(x + f)^2} = 0 \quad \dots \text{式 2.1}$$

17

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{0 \cdot (x + f) - x \cdot (0 + \frac{\partial f}{\partial y})}{(x + f)^2} = 0 \quad \dots \text{式 2.2}$$

式 2.1 及び式 2.2 において、分母 $(x + f)^2 > 0$ より分子 $= 0$ となる。
従って、①の場合において、システム効率が最大となる条件は、次の
式 2.3 及び式 2.4 を満たすときである。

$$5 \quad \frac{f}{x} - \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad \dots \text{式 2.3}$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = 0 \quad \dots \text{式 2.4}$$

②及び③の場合も同様に求めたところ、システム効率が最大になる
とき効率は極値をとる、または損失率が最小となるとき損失率は極値
をとることから求められた条件は、いずれの場合も同様の条件、具体
10 的には式 2.3 及び式 2.4 を満たすこととなった。即ち、システム効率
の定義が異なり、効率の数字そのものが異なっている、また損失率
で考えても、いずれの場合も同じ電池出力、内部パラメータでシステ
ム効率が最大(損失率が最小)になる。従って、レドックスフロー電池
の出力や内部パラメータと損失との関係をシミュレーションし、この
15 損失を AC 端電池出力で割れば損失率が求められる。図 1 にレドク
スフロー電池における損失特性と損失率との関係を示すグラフの一例
を示す。

図 1 に示すように、充電の場合(システム出力が正の場合)、電池及
び変換器は、システム出力が 150% 弱のとき損失率が最小になってお
り、このとき電池ロス、変換器ロスを最小とすることができることが
20 わかる。放電の場合、電池及び変換器は、システム出力が約 -100% の
とき損失率が最小になっており、このとき電池ロス、変換器ロスを最
小とすることができることがわかる。

以上から、電池出力が一定の場合、システム効率を最大にする（損失率を最小にする）、即ち、システムの損失を最小にする電池出力や内部パラメータを決めることができることがわかる。

5 (電池出力が確率的な現象に依存する場合)

次に、発電出力が不規則変動する、具体的には電池出力が確率分布を持つ場合を考える。一定時間間隔(Δt)ごとの電池出力を x_1, x_2, \dots, x_n 、内部パラメータを y 、損失を $f(x_1, y), f(x_2, y), \dots, f(x_n, y)$ 、充電時又は放電時のシステム効率を η とする。電池出力 x_1, x_2, \dots, x_n は、確率分布を持つことから、平均 x_{ave} は式 3.1、分散 σ^2 は式 3.2 となる。そして、 $f(x_i, y)$ を x_{ave} を中心にテーラー展開すると式 3.3 となる。

$$x_{ave} = \frac{\sum x_i}{n} \quad \dots \text{式 3.1}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - x_{ave})^2}{n} \quad \dots \text{式 3.2}$$

$$f(x_i, y) = f(x_{ave}, y) + \frac{\partial f}{\partial x}(x_i - x_{ave}) + \frac{\partial^2 f}{2\partial x^2}(x_i - x_{ave})^2 + \dots \quad \dots \text{式 3.3}$$

式 3.1 より、 $\sum x_i = n \cdot x_{ave}$ (式 3.4)、式 3.3 より $\sum f(x_i, y)$ は式 3.5 となる。

$$\sum f(x_i, y) = n \cdot (f(x_{ave}, y) + \frac{\partial^2 f}{2\partial x^2} \sigma^2 + \dots) \quad \dots \text{式 3.5}$$

ここで、式 3.4 の $n \cdot x_{ave}$ を上記電池出力が一定である場合の x とみなし、式 3.5 のうち、下記の式 3.6 に示す部分を $f(x, y)$ とみなせば、電池出力が確率分布を持つ場合も、上記電池出力が一定である場合と同様に扱うことができる。

$$n \cdot (f(x_{ave}, y) + \frac{\partial^2 f}{2\partial x^2} \sigma^2 + \dots) \quad \dots \text{式3.6}$$

そして、 $f(x, y)$ を x の関数とみなし、電池や変換器の損失特性を実用的に二次関数とみなすと、3 次以上の導関数は実質的にゼロとみることができる。具体的には、一定の電池出力 x に対して、損失特性

5 $f(x) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ (式 3.7) と扱うところを確率分布を考慮する場合は、電池出力の平均値 x_{ave} 、分散 σ^2 に対して $g(x_{ave}, \sigma^2) = a \cdot x_{ave}^2 + b \cdot x_{ave} + c + a \cdot \sigma^2$ (式 3.8) と扱えばよいということである。

(実施例)

発電出力が不規則変動する発電装置と、この発電出力を平滑化する

10 レドックスフロー電池と、電池の出力を変換する直流/交流変換器とを具えるレドックスフロー電池システムを作製し、電池や変換器の損失特性を調べてみた。

発電装置は、最大発電出力 400kW(規定発電出力 275kW)の風力発電とした。レドックスフロー電池は、図 8 に示す構成のものを作製し、

15 規定出力を 170kW(規定発電出力の約 60%)とした。直流/交流変換器は、規定出力 275kW のものを用いた。これら発電装置、レドックスフロー電池、変換器を具える電池システムについて、8 時間あたりの電池出力のヒストグラムを図 2 に示す。また、以下に分布特性を示す。

標準偏差は、発電装置の発電出力を電池で平滑化し、平滑化された発電

20 出力に対する電池の出力分布から求めた。なお、電池の規定出力とは、負荷平準化運転時にシステム効率が最大となる出力であり、変換器の規定出力とは、直流→交流又は交流→直流の変換効率が最大となる出力である。

発電出力平滑化時における充放電電力の分布特性

25 平滑化された風力発電出力：200kW

20

電池出力の平均値 : 0.9kW

電池出力の標準偏差 : 54.1kW

電池出力の絶対値の平均 : 44.4kW

5 (変換器の台数を決定する場合)

次に、直流/交流変換器の損失特性(工場試験による)を求めた。図3にその結果を示す。図3に示す近似曲線から、変換器のロス $f(x)$ は、一定の電池出力 x に対して、式 3.7 から $f(x) = 1.22 \times 10^{-4} \cdot x^2 - 1.74 \times 10^{-6} \cdot x + 4.58$ となる。従って、確率分布を持つ風力発電の平滑化時における電池出力に対して、損失特性の期待値は、式 3.8 より ($x_{ave} = 0.9$ 、 $\sigma^2 = 54.1^2$)、 $g(x_{ave}, \sigma^2) = 1.22 \times 10^{-4} \cdot (0.9^2 + 54.1^2) - 1.74 \times 10^{-6} \cdot 0.9 + 4.58 = 4.94 \text{ kW}$ となる。なお、上式 $g(x_{ave}, \sigma^2)$ において、損失に対する平均値 x_{ave} の影響は無視できるほど小さい。

上記規定出力 275kW の変換器の損失特性を保つことができる内部パラメータをより具体的に検討する。例えば、内部パラメータとして、上記規定出力 275kW の変換器を n 台並列に用いる場合を考える。すると、変換器 1 台あたりの出力は、 $1/n$ となる。従って、変換器 1 台あたりの損失特性の期待値は、 $f(x) = 1.22 \times 10^{-4} \cdot (x/n)^2 - 1.74 \times 10^{-6} \cdot (x/n) + 4.58$ となるから、 n 台並列に用いた場合の合計の損失特性の期待値は、 $f(x, n) = 1.22 \times 10^{-4}/n \cdot x^2 - 1.74 \times 10^{-6} \cdot x + 4.58 \cdot n$ となる。よって、 $g(x_{ave}, \sigma^2, n) = 1.22 \times 10^{-4}/n \cdot (x_{ave}^2 + \sigma^2) - 1.74 \times 10^{-6} \cdot x_{ave} + 4.58 \cdot n$ となる。平均： $x_{ave} = 0.9$ 、分散 $\sigma^2 = 54.1^2$ より、 $g(n) = 1.22 \times 10^{-4}/n \cdot (0.9^2 + 54.1^2) - 1.74 \times 10^{-6} \cdot 0.9 + 4.58 \cdot n \doteq 0.3572/n - 1.57 \times 10^{-6} + 4.58 \cdot n$ となるから、 $\partial g / \partial n = 0$ となる n を求めると、 $0.3572/n^2 + 4.58 = 0$ 、従って、 $n \doteq 0.28$ である。

n の可変範囲は $0 \leq n \leq \infty$ から、 n の可能最小値として 0、可能最大

2 1

値として無限大が挙げられるが、 $n \rightarrow 0$ のとき $g \rightarrow \infty$ 、 $n \rightarrow \infty$ のとき $g \rightarrow \infty$ となるため、上記 $n \doteq 0.28$ が最適値となる。

つまり、上記規定出力 275kW の変換器を 0.28 台使用した際に損失を最小にできるということである。或いは、規定出力が $275 \times 0.28 \doteq$
 5 77kW の変換器を使用する場合に損失を最小にできるということである。図 4 に変換器の損失特性(変換器ロス)の期待値を示す。

図 4 から、本例の場合、直流/交流変換器の規定出力は、約 50～200kW(標準偏差 54.1kW の約 1～4 倍)、特に 50～120kW(同約 1～2.2 倍)のとき、変換器ロスが小さく、そのためシステムの損失を小さく
 10 できることがわかる。そして、上記より、規定出力を 77kW とすると、システムの損失を最小とすることができることがわかる。

(電池の台数及び単位時間あたりの流量を決定する場合)

次に、レドックスフロー電池の損失特性を求めた。図 5 にその結果
 15 を示す。電池の損失特性(電池ロス)は、一セルに対する電解液の単位時間あたりの流量によって変化するため、流量を下記の通りに変化させて特性を求めた。

- ① 0.80 リットル/分・セル
- ② 1.00 リットル/分・セル
- 20 ③ 1.15 リットル/分・セル

図 5 に示す近似曲線から、電池の損失特性は、上記変換器の場合と同様に求められる。即ち、例えば、②流量が 1.00 リットル/分・セルの場合、確率分布を持つ風力発電の平滑化時における電池出力に対して、式 3.8 より $g(x_{ave}, \sigma^2) = 4.33 \times 10^{-4} \cdot (x_{ave}^2 + \sigma^2) - 2.28 \times 10^{-2} \cdot x_{ave}$
 25 $+ 11.6$ となる。従って、損失特性の期待値は、 $x_{ave} = 0.9$ 、 $\sigma^2 = 54.1^2$ から、 $g(x_{ave}, \sigma^2) = 4.33 \times 10^{-4} \cdot (0.9^2 + 54.1^2) - 2.28 \times 10^{-2} \cdot 0.9 + 11.6$

2 2

=12.8kW となる。③流量が 0.80 リットル/分・セルの場合、同様に式 3.8 より $g(x_{ave}, \sigma^2) = 4.72 \times 10^{-4} \cdot (x_{ave}^2 + \sigma^2) - 2.35 \times 10^{-2} \cdot x_{ave} + 9.2$ となり、損失特性の期待値は、同様に $g(x_{ave}, \sigma^2) = 10.6kW$ となる。

上記規定出力 170kW の電池において、損失特性を保つことができる
 5 内部パラメータをより具体的に検討する。例えば、内部パラメータとして、上記規定出力 170kW の電池を n 台並列に用いる場合を考える。また、運転条件として、一セルに対する電解液の単位時間当たりの流量も求めてみる。すると、電池 1 台あたりの出力は、 $1/n$ となる。従って、電池 1 台あたりの損失は、 $f(x) = a(x/n)^2 + b(x/n) + c$ となる
 10 から、n 台並列に用いた場合の合計の損失特性の期待値は、 $f(x, n) = ax^2/n + bx + cn$ となる。 $f(x, n)$ における係数 a, b, c は、図 5 に示す近似式から得られる。また、これら係数 a, b, c と一セルに対する電解液の単位時間当たりの流量との関係を図 6 に示す。

図 6 に示す各係数についてのグラフは、図 5 に示す二次関数の各次
 15 の係数により求めた。例えば、係数 a は、図 5 に示す①～③の二次関数において 2 次の係数：4.14、4.33、4.72 から、その近似式を求めると、変数 a' を用いて、 $a(\times 10^{-4}) = (-1.673) \cdot a' + 6.0418$ と求められる。係数 b, c についても同様である。

そして、一セルあたりの電解液の流量を L(リットル/分)とすると、
 20 図 5 及び 6 から、 $f(x, n, L) = \{(-1.673L + 6.0418) \times 10^{-4}\} / n \cdot x^2 + \{(-0.073L + 2.3918) \times 10^{-2}\} \cdot x + \{(1.3622L - 0.1795) \times 10^1\} \cdot n$ となる。

従って、 $g(x_{ave}, \sigma^2, n, L) = \{(-1.673L + 6.0418) \times 10^{-4}\} / n \cdot (x_{ave}^2 + \sigma^2) + \{(-0.073L + 2.3918) \times 10^{-2}\} \cdot x_{ave} + \{(1.3622L - 0.1795) \times 10^1\} \cdot n$ となる。平均： $x_{ave} = 0.9$ 、分散 $\sigma^2 = 54.1^2$ より、 $g(n, L) = (-0.490L + 1.769) / n + (-0.0657L + 2.153) \times 10^{-2} + \{(1.3622L - 0.1795) \times 10^1\} \cdot n$
 25 となる。 $\partial g / \partial n = 0$ となる n を求めると、 $\partial g / \partial n = -(-0.490L +$

23

$1.769)/n^2 + (13.622L - 1.795) = 0$ 、従って、 $n = \sqrt{\{(-0.490L + 1.769)/(13.622L - 1.795)\}}$ である。

また、 $\partial g / \partial L = 0$ となる n を求めると、 $\partial g / \partial L = -0.490/n - 0.000657 + 13.622 \cdot n = 0$ 、従って、 $n > 0$ より、 $n \doteq 0.19$ である。この
5 とき、 L は、 $0.19 = \sqrt{\{(-0.490L + 1.769)/(13.622L - 1.795)\}}$ より、 $L \doteq 1.87$ (リットル/分) となる。

ここで、本例に示すレドックスフロー電池の電解液流量の可能範囲を $0.8 \sim 1.15$ リットル/分とすると、上記の $L \doteq 1.87$ は、可変範囲外の値である。従って、 L の可変範囲における最適値の候補は、

10 $\partial g / \partial n = 0$ となる n と、 L の可変範囲における最小値 0.8 との組み合わせ、即ち、 $(n, L) = (0.39, 0.8)$ 、或いは、

$\partial g / \partial n = 0$ となる n と、 L の可変範囲における最大値 1.15 との組み合わせ、即ち、 $(n, L) = (0.29, 1.15)$
となる。

15 上記の値を $g(x_{ave}, \sigma^2, n, L)$ に代入すると、 $(n, L) = (0.39, 0.8)$ の場合、最適値となる。

つまり、上記規定出力 170kW の電池を 0.39 台使用すると共に、電解液の流量を 0.8 リットル/分とした際に損失を最小にできるということである。或いは、規定出力が $170 \times 0.39 \doteq 66.3\text{kW}$ の電池を使用する
20 場合に損失を最小にできるということである。図 7 に電解液流量の可能範囲を $0.8 \sim 1.15$ リットル/分とした場合の期待値 $g(x_{ave}, \sigma^2, n, L)$ のグラフを示す ($x_{ave} = 0.9$ 、分散 $\sigma^2 = 54.1^2$ とする)。

図 7 から、本例において、例えば、上記②に示す流量が 1.00 リットル/分・セルの場合、電池の規定出力は約 $40 \sim 100\text{kW}$ (標準偏差
25 54.1kW の約 $0.74 \sim 2$ 倍)、特に $50 \sim 80\text{kW}$ (同約 $0.92 \sim 1.5$ 倍) のとき、電池ロスが小さく、そのためシステムの損失を小さくできることがわ

24

かる。そして、上記より、流量を 0.8 リットル/分・セル、電池の規定出力を 66.3kW とすると、システムの損失を最小とすることができることがわかる。

5 以上から、風力発電の安定化というようなシステムの充放電電力の
平均値がほぼゼロで、不規則充放電を行う場合において、電池や直流
/交流変換器の規定出力、電解液の流量などの内部パラメータの設計
が、電池出力などの設計者が任意に選択することができないパラメー
タの平均値や分散などを用い、基本的な統計量から求められることが
10 わかった。また、電池及び変換器の少なくとも一方の規定出力を電池
出力の標準偏差を考慮して決定することでシステムの損失を低減でき
ることが確認できた。特に、電池の規定出力は、標準偏差の 0.7 倍以
上 2 倍以下、変換器の規定出力は、標準偏差の 1 倍以上 4 倍以下にす
るとシステムの損失をより低減し、引いてはシステム効率をより向上
することができて好ましいことがわかった。

15 本例のシステムでは、例えば、平滑化する風車の数や時間窓を増加
するなどして、本例の場合の約 1.5~2 倍程度となる変動の平滑化を
行うようにすれば、変換器の損失を $(5 - 2.5)/5 =$ 約 50% 低減し(図 4
参照)、電池の損失を $(15 - 8)/15 =$ 約 47% 低減して、システムの損失
を低減できると推測される。即ち、本例のシステムでは、電池出力の
20 絶対値の平均 44.4kW のところで、変換器の損失 + 電池の損失 $= 5 + 15$
 $=$ 約 20kW ロスしていたところを、合計で $2.5 + 8 =$ 約 10.5kW と損失
を低減する。従って、システムの損失率を $20/44.4 =$ 約 45% から
 $10.5/44.4 =$ 約 24% とほぼ半分にするができる。

25 (試験例)

上記実施例で用いたレドックスフロー電池や直流/交流変換器の規

25

定出力を変化させて、システムの損失を調べてみた。試験では、いずれの試料も、風力発電とし、最大出力：400kW、規定発電出力：285kWとした。表1に試験に用いたレドックスフロー電池の規定出力及び変換器の規定出力、電池システムの損失を示す。

表 1

試料 No.	電池の 規定出力 (kW)	変換器の 規定出力 (kW)	電池システム 損失 (kW)	風力発電の 平滑化
1	170	275	20	良好
2	85	147	10	良好
3	60	200	10	良好

表 1 の試料 No. 2 及び 3 は、上記実施例で求めた電池出力の標準偏差からレドックスフロー電池の規定出力、及び直流/交流変換器の規定出力を決定したものである。試料 No. 2 は、電池の規定出力を標準偏差 54.1kW の 1.6 倍、変換器の規定出力を同 2.7 倍とした。試料 No. 3 は、電池の規定出力を標準偏差 54.1kW の 1.1 倍、変換器の規定出力を同 3.7 倍とした。一方、試料 No. 1 は、電池出力の標準偏差を特に考慮せず、電池及び変換器の規定出力を決定したものである。試験の結果、表 1 に示すように試料 No. 2 及び 3 は、電池システムの損失が少なく、試料 No. 1 のほぼ半分であることがわかる。

産業上の利用可能性

以上説明したように本発明レドックスフロー電池システムの設計方法によれば、外部パラメータの平均値と標準偏差に基づいて内部パラメータの最適値を決定することで、システムを評価する指標関数の最適化を図ることができるという優れた効果を奏する。

特に、電池出力の平均値と標準偏差に基づいて電池や直流/交流変換器の規定出力を決定することで、システムの損失を低減することができる。そのため、従来のように鉛蓄電池を併設することなく電池シ

27

システムの損失を低減できるため、システムのハードウェアの規模が従来と比較して小さくて済み、合理的である。更に、鉛蓄電池を別途設けないことで、コストを安くすることもできる。

28

請求の範囲

1. セルに電解液を供給・排出させるレドックスフロー電池を具えるレドックスフロー電池システムの設計方法であって、

5 設計者が任意に選択することができないレドックスフロー電池の運転条件によって与えられる外部パラメータを決定し、

設計者が任意に設計することができるレドックスフロー電池の設計条件によって与えられる内部パラメータを決定し、

前記外部パラメータの変動値の平均及び標準偏差を求め、

10 前記内部パラメータの最適値を前記平均及び標準偏差の少なくとも一方に基づいて決定することを特徴とするレドックスフロー電池システムの設計方法。

2. 外部パラメータは、発電出力が不規則変動する発電装置の発電出力を平滑化する電池の出力、電池の設置場所の外気温、及び消費電力が不規則変動する負荷の消費電力を平滑化する電池の出力の少なくとも一つを含み、

15

前記内部パラメータは、電池の規定出力、電池の個数、セル数、電解液を貯留するタンクの液量、一セルあたりの電解液の流量、電解液の温度、電池の出力を変換する直流/交流変換器の規定出力、及び電池の出力を変換する直流/交流変換器の個数の少なくとも一つを含むことを特徴とする請求の範囲第1項に記載のレドックスフロー電池システムの設計方法。

20

3. 発電出力が不規則変動する発電装置の発電出力を平滑化するレドックスフロー電池の出力分布の平均及び標準偏差を求め、

25 電池の規定出力、電池の個数、電池の出力を変換する直流/交流変換器の規定出力、及び電池の出力を変換する直流/交流変換器の個数

29

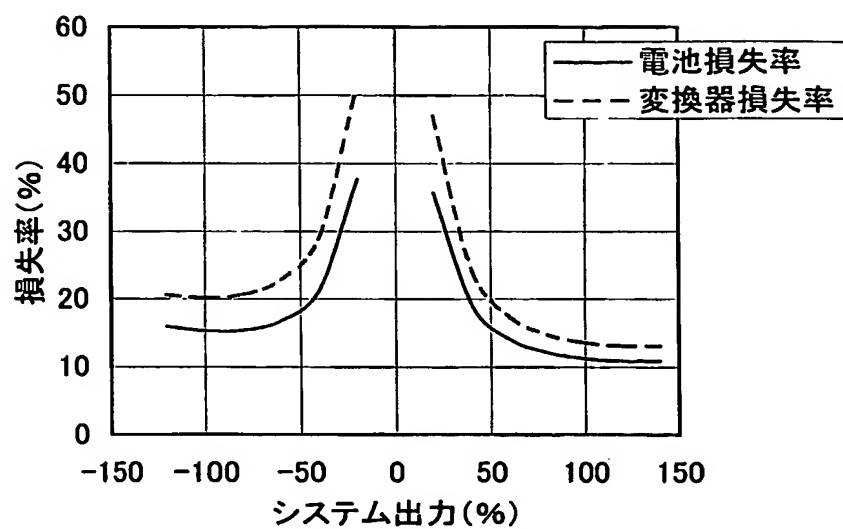
の少なくとも一つを前記平均及び標準偏差に基づいて決定することを特徴とする請求の範囲第2項に記載のレドックスフロー電池システムの設計方法。

4. 直流/交流変換器の規定出力を標準偏差の1倍以上4倍以下とする
5 することを特徴とする請求の範囲第3項に記載のレドックスフロー電池システムの設計方法。

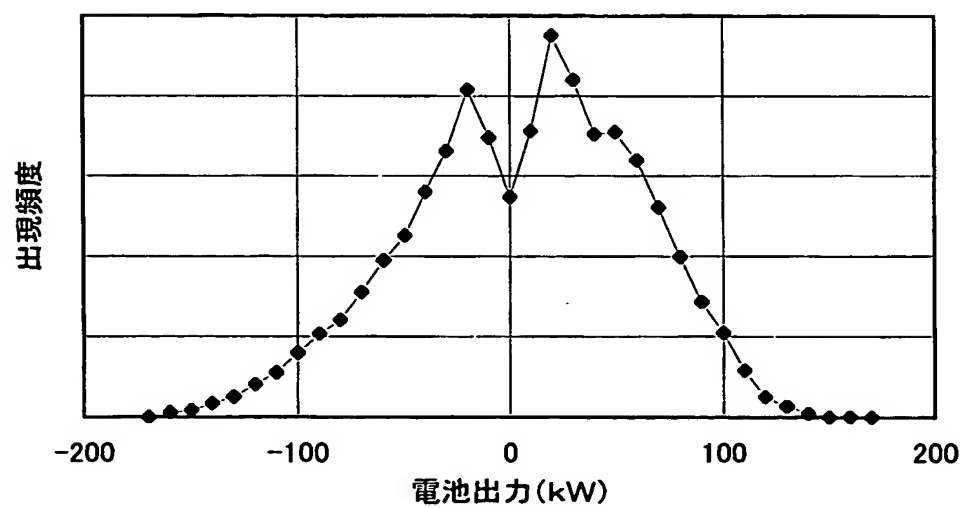
5. 電池の規定出力を標準偏差の0.7倍以上2倍以下とすることを特徴とする請求の範囲第3項に記載のレドックスフロー電池システムの設計方法。

1 / 5

第1図

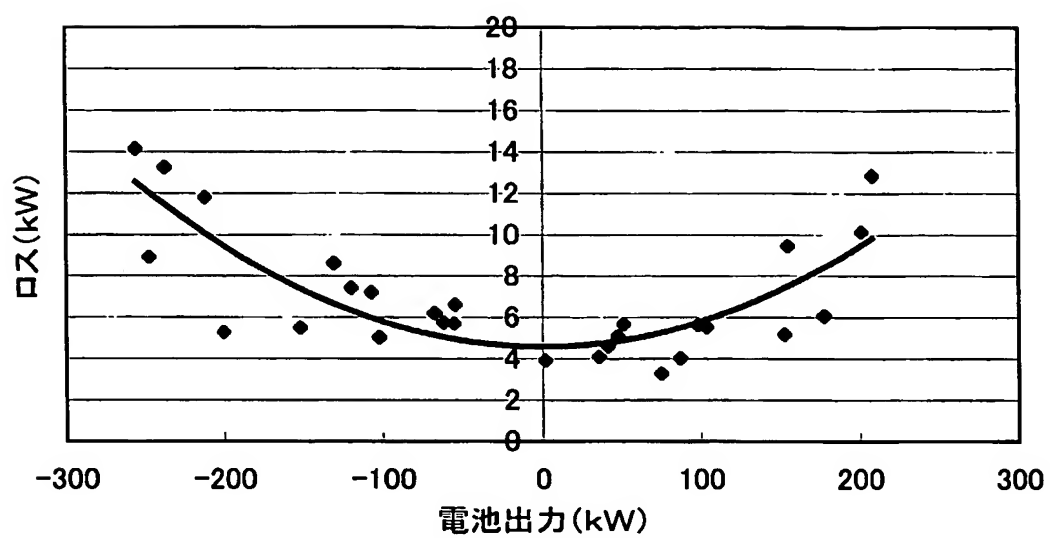


第2図

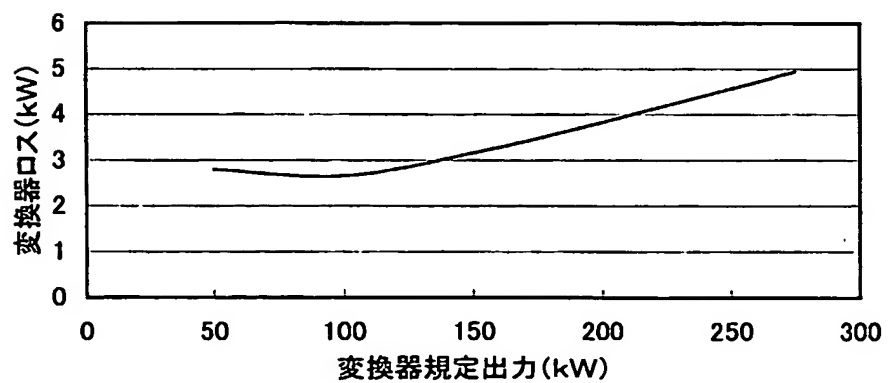


2 / 5

第3図

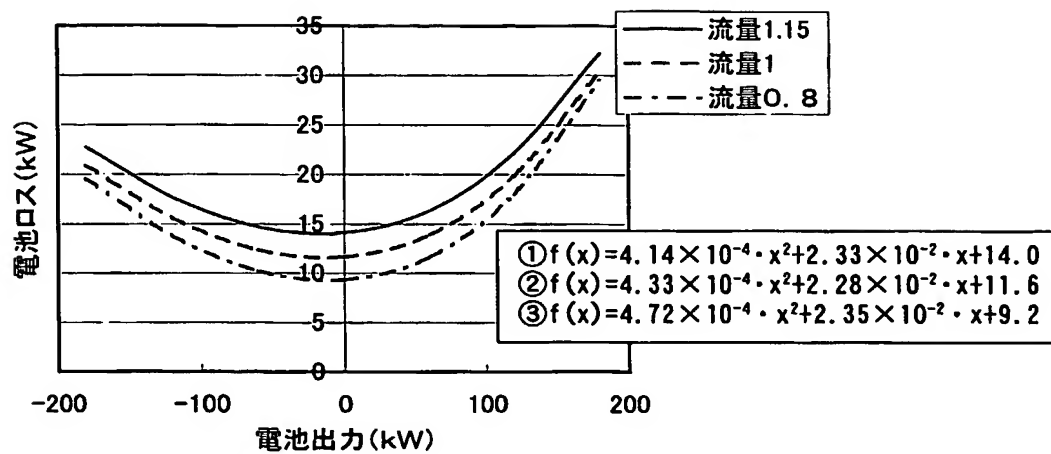


第4図

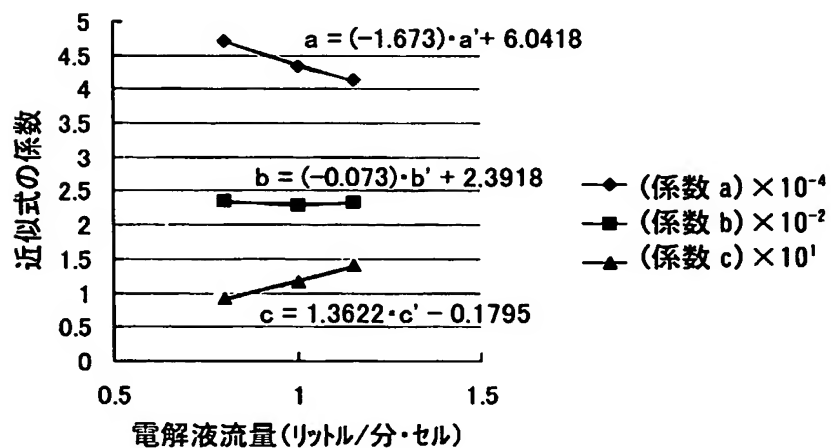


3 / 5

第5図

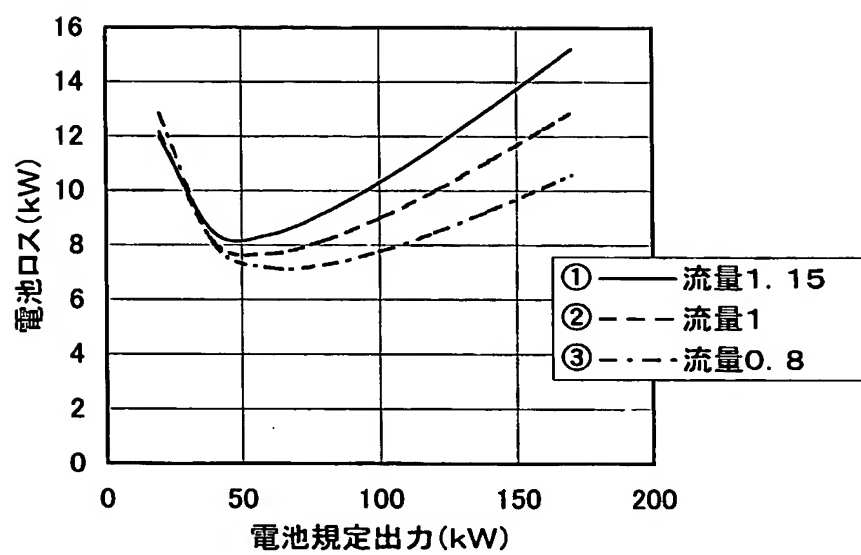


第6図



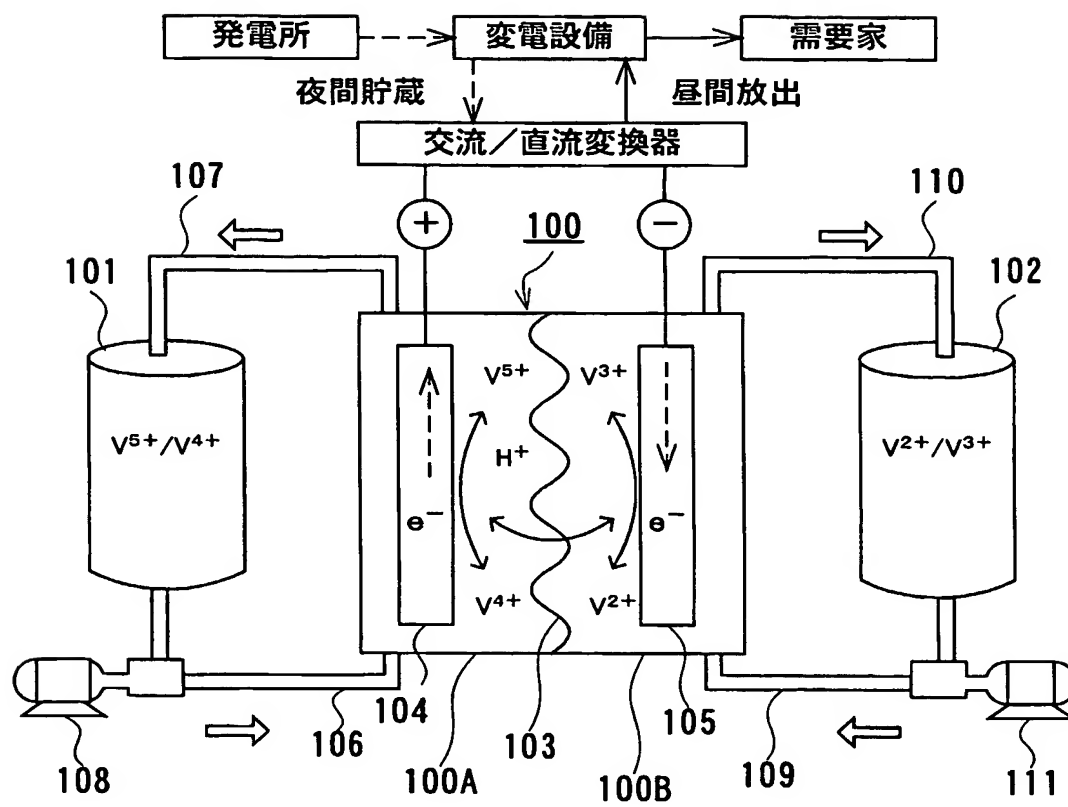
4 / 5

第7図



5 / 5

第8図



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP03/05059

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl⁷ H01M8/18, H01M8/04

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl⁷ H01M8/18, H01M8/04

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2003
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2003 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2003

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
WPI/L

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 4-12464 A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 17 January, 1992 (17.01.92), Claims; Figs. 1 to 5 (Family: none)	1-5
Y	JP 2001-339995 A (Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.), 07 December, 2001 (07.12.01), Claims; Par. No. [0017]; Fig. 1 (Family: none)	1-5
Y	JP 2000-78895 A (Hitachi Engineering & Services Co., Ltd.), 14 March, 2000 (14.03.00), Claims; Figs. 1 to 7 (Family: none)	1-5

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search
16 May, 2003 (16.05.03)

Date of mailing of the international search report
03 June, 2003 (03.06.03)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

International application No.

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet) (July 1998)

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ H01M8/18、H01M8/04

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ H01M8/18、H01M8/04

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2003年
 日本国登録実用新案公報 1994-2003年
 日本国実用新案登録公報 1996-2003年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

WPI/L

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	J P 4-12464 A (住友電気工業株式会社) 1992. 01. 17 特許請求の範囲、第1-5図 (ファミリーなし)	1-5
Y	J P 2001-339995 A (石川島播磨重工業株式会社) 2001. 12. 07 【特許請求の範囲】、【0017】、【図1】 (ファミリーなし)	1-5
Y	J P 2000-78895 A (株式会社日立エンジニアリングサービス) 2000. 03. 14 【特許請求の範囲】、【図1】-【図7】 (ファミリーなし)	1-5

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献
 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

16. 05. 03

国際調査報告の発送日

3.06.03

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
 郵便番号100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)
 前田 寛之



4X

2930

電話番号 03-3581-1101 内線 3477

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	JP 2000-73932 A (株式会社日立エンジニアリングサービス) 2000.03.07 【特許請求の範囲】、【図1】－【図7】 (ファミリーなし)	1-5
Y	JP 2000-73931 A (株式会社日立エンジニアリングサービス) 2000.03.07 【特許請求の範囲】、【図1】－【図8】 (ファミリーなし)	1-5